

Твердотельная электроника

PACS: 72.10.Di, 72.80.Ey, 74.40.+k

I.C. Вірт¹, I.C. Білік¹ О.А., Парфенюк², М.І. Ілащук²

Шумові і транспортні властивості кристалів $\text{CdTe}<\text{Pb}>$

Проведені дослідження струмового шуму в монокристалічних зразках $\text{CdTe}<\text{Pb}>$. Аналіз шумових даних виконаний в рамках моделі, заснованої на уявленні про бістабільні дефекти – флуктуатори, які виступають в якості причини виникнення $1/f$ шуму. Передбачається, що ці типи дефектів і неоднорідності можуть приводити до спостережуваних спектрів шуму. Енергія активації флуктуаторів, обчислена з температурної залежності низькочастотного шуму складає 0,74 еВ. В області порівняно середніх частот спектральна залежність потужності шуму зазнає перегину, характерного для шуму генерації-рекомбінації.

Researches of current noise in the monocrystalline samples $\text{CdTe}<\text{Pb}>$ are conducted, taking into account the presence of defects of grate and possible clusters in a crystalline matrix. It is foreseen; that these types of defects and heterogeneity can lead to the spectrums of noise looked after. Noise data analysis, is executed within the framework of the model based on the picture of bi stabling defects – fluctuates, salient in qualities of reason of origin of $1/f$ noise. The energy of activating of fluctuation, calculated from temperature dependence of low-frequency noise makes 0,74 eV. In area of comparatively middle frequencies spectral dependence of power of noise acquires the fractures of characteristic for a noise generation-recombination.

Ключові слова: струмовий шум, флуктуатор, кристалічний CdTe легований домішок свинцю.

Вступ

Спектроскопію дефектів і домішок в напівпровідникових матеріалах A_2B_6 , зокрема CdTe , досліджують використовуючи ряд методів: наприклад, спектроскопію глибоких рівнів (DLTS) і фотоіндуковану спектроскопію (PICST). Шумові методи, які застосовують до напівпровідникових матеріалів [1], зокрема і до з'єднань A_2B_6 [2-4], дозволяють розрізняти глибокі рекомбінаційні енергетичні рівні, розміщені в середині забороненої зони, а також їх тип. Метод шумової спектроскопії - це достатньо перспективний метод

дослідження домішок в напівпровідниках в різних частотних діапазонах, зокрема на частотах перебиття надмірного ($1/f$) шуму і шуму генерації-рекомбінації. При цьому можна оцінити тип провідності, значення концентрації носіїв заряду і при врахуванні електропровідності і їх рухливість. Спектральний вид спектрів густини потужності шуму може вказувати на наявність декількох джерел шумів. Порівняння результатів, отриманих різними методами дають більш точні моделі природи дефектів в напівпровідниках [5]. Стаття представляє результати вивчення характеристик шуму об'ємних кристалів телуриду кадмію, легованих свинцем.

1. Вимірювальна апаратура і методика експерименту

Досліджено властивості шуму зразків $\text{CdTe}<\text{Pb}>$ з питомим опором порядку $\rho \approx 10^8 \div 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ при кімнатній температурі. Об'ємні монокристали телуриду кадмію з концентрацією домішки ($\text{NPb} = 10^{17} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) діркової провідності (рис. 1, і рис. 2) вирощені методом Бріджмена [6].

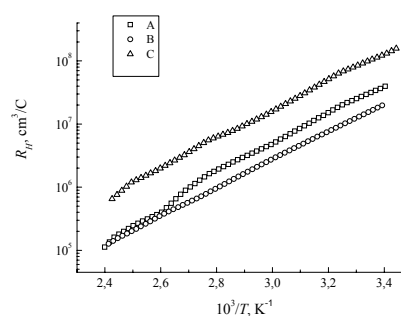


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта Хола в зразках $\text{CdTe}<\text{Pb}>$.

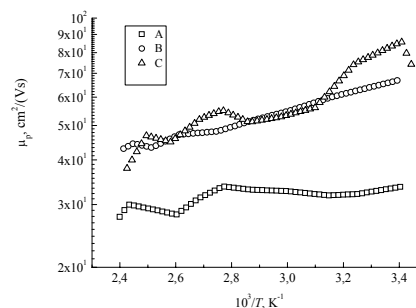


Рис. 2. Температурна залежність холівської рухливості носіїв заряду в зразках $\text{CdTe}<\text{Pb}>$.

Спектри шуму були досліджені в широкому спектрі частот, від 10 Гц до 100 кГц. Провідність і спектральна густина флуктуацій опору вимірювалися стандартним чотирьохконтактним методом [7]. Вимірювання шуму виконували прямою технікою через підсилювач напруг. Досліджувана змінна напруга (AC) шуму з потенційних контактів подавалася на узгоджувачий підвищуючий підсилювач Unipan 233-7-1 (20 dB), фільтр низьких частот і аналізатор спектру С8-15. Використано також схему, що включає плату збору даних сигналу, який направлявся на сигнальний аналізатор HP 35660A для Фур'є перетворення з виходом на комп'ютер. Приведене до входу підсилення складало 10^6 . Програма дозволяла отримувати окремі вибірки спектрів шуму. Було здійснено більш ніж 10 вибірок, щоб отримати енергетичну спектральну густину S_U . Спектральна густина була виміряна в частотному діапазоні для ряду напруг зміщення U (DC) на досліджуваних зразках. В спектрах шуму вибірка при нульовому зміщенні відповідає білому шуму і задовільно узгоджується з розрахованими результатами.

Стаціонарний нерівноважний (струмовий) стан встановлювався при пропусканні через зразок постійного струму, що задавався від акумуляторної батареї з обмежувачем доточним резистором. Опір резистора перевищував у багато разів опір зразка і струмових контактів. Сила струму визначалася максимальною допустимою вхідною напругою, прикладеною до первинної обмотки узгоджувачого трансформатора, і складала 40 мА. Оскільки при такій схемі вимірювань можуть мати місце флуктуації опору струмових контактів, які на опорі зразка трансформуються в шум вимірювальної напруги, то для оцінки цього ефекту у вимірювальне коло включався також послідовно доточний резистор того ж опору, що і досліджувальні зразки. Вимірювання на такому еквіваленті зразка показали, що контактні шуми нехтовно малі, аж до 10 кГц, і для прикладеної напруги від 0 до 100 В. Згідно з дослідженням шуму в спектрі переважають два види: в основному надмірний $1/f$ і генераційно-рекомбінаційний (GR). Аналіз низькочастотного шуму виконували, розглядаючи присутність макродефектів і кластерів включень в кристалічній матриці. Передбачається, що ці види немонотонностей проводять до присутності спектрів шуму, особливо в сильнолегованому матеріалі ($\text{NPb} > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

2. Експериментальні результати

Переважно у всіх вимірювальних зразках $\text{CdTe}<\text{Pb}>$ спектри шуму є монотонними з моно-

тонним падінням густини потужності, яка слідує в більшості випадків залежності $1/f_\gamma$ ($\gamma \approx 0,9$). Проте в області середніх частот існує значне відхилення від цієї залежності з $\gamma < 1$. Концентрація домішок і дефектів впливає на спектральний вигляд шумів на низьких частотах згідно емпіричній залежності Хооге [8]:

$$\frac{S_U(f)}{U^2} = \frac{\alpha}{N_0 f} \quad (1)$$

α - емпірична константа, N_0 - число носіїв заряду в напівпровіднику (це виражено через p_0 - концентрацію носіїв заряду в напівпровіднику помножену на V - об'єм).

Шум (S_U) при кімнатних температурах пропорційний квадрату темного струму що протікає через зразок. Як величина, так і вигляд спектрів залежать від значення провідності кристала. Виявлено накладання на надмірний струмовий шум генераційно-рекомбінаційних компонент (GR) шуму в певних значеннях частот (f_{0i}), які мають вигляд лоренціанів. Експериментальні криві зіставлені з характерними для GR-спектрів залежностями для флуктуацій носіїв заряду -

$\frac{S_U}{U^2} = \frac{S_N}{N^2} = \frac{A\tau}{1 + (f/f_0)^2}$, де f_0 - частота переходу до лоренціану.

Для отримання положення енергетичних рівнів, лоренціани які лежать в області низьких частот спектральної густини шуму, представлено у координатах

$\frac{S_U(f)}{U^2} \times f \sim f$ [9]. Тривалості часів життя

носіїв τ_i оцінені по частоті спаду f_{0i} даної амплітуди A_i для i -того рекомбінаційного рівня відповідно. Енергія активації E_a отримана із температурної залежності величини часу життя.

На спектральних кривих шуму виявляються деякі піки, які, згідно з іншими дослідженнями [10], можуть бути викликані наявністю локальних рівнів всередині забороненої зони кристалів. Приріст вкладу піків особливо помітний на порівняно високих частотах і спостерігається на спектральній густині шуму представлений у нормалізованих координатах $S_U(f) \times f \sim f$ (рис. 3). Вказані немонотонності можуть бути пов'язані із іншим типом шуму, а саме шумом GR:

$$\frac{S_U}{U^2} = \frac{4N_t}{VN_0^2} \frac{\tau}{1 + (f/f_0)^2}, \quad (4)$$

де N_t - концентрація пасток.

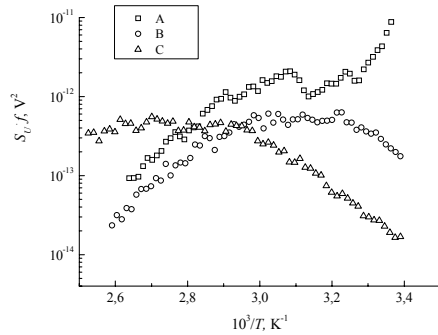


Рис. 3. Температурні залежності інтенсивності густини шуму (1 кГц) у зразках CdTe<Pb> приведені до нормованих координат $S_U \times f(f)$.

Аналіз надмірного струмового шуму виконували, беручи до уваги присутність дефектів ґратки і можливих кластерів у кристалічній матриці. Передбачається, що ці типи дефектів і неоднорідності можуть приводити до спостережуваних спектрів шуму. Енергія активації, обчислена з температурної залежності низькочастотного шуму складає 0,74 еВ (рис. 3), а з електрофізичних вимірювань, зокрема, постійної Хола складає 0,48 еВ. В області порівняно середніх частот спектральна залежність потужності шуму набуває зламів шуму генерації-рекомбінації.

У загальному випадку постійна Хоогє є параметром інформування про структурну однорідність (гомогенність) ґратки. Зокрема, цей параметр залежить від дисперсії величини рухливості носіїв заряду в кристалічних ґратках при різних температурах. Особливість максимальної зміни в рухливості носіїв заряду існує при їх розсіюванні на оптичних фононах. Зміна температури може змінювати вклад відповідно як оптичної так і акустичної компоненти, які визначають відповідно дві постійні Хоогє - α [11]:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_A \quad (5)$$

Немонотонне різке падіння шуму із зростанням концентрації домішки, а також поява немонотонності на залежності $S_U(f) \times f \sim f$ в області низьких частот вказує на появу більш крупних дефектів, можливо кластерів і включень. Величина α досить чутлива до структурної досконалості матеріалу (див., наприклад [12]). Для структурно досконалих напівпровідникових плівок значення α складає звичайно $10^{-4} \div 10^{-5}$. Для епітаксialьних плівок GaAs це значення дорівнює $10^{-3} \div 10^{-5}$. Для плівок GaN звичайної якості з концентрацією Nd-Na $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ величини α , як правило, набагато вищі і лежать в межах $10^{-2} \div 1$ [8]. Тому поведінка структурних дефектів, які виникають в процесі росту в

кристалічному CdTe може викликати вид шуму GR на спектральній залежності в області низьких частот.

Експериментально отримані із співвідношення Хоогє величини параметра α як функції температури для групи зразків приведені на рис. 4.

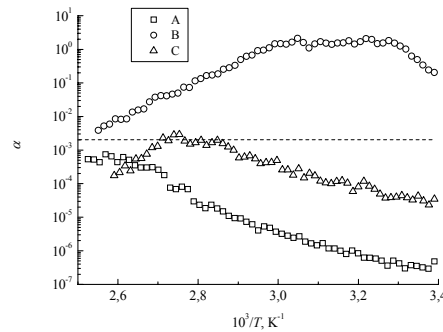


Рис. 4. Температурні залежності параметра Хоогє (1 кГц) у зразках CdTe<Pb>.

Величину повної кількості носіїв заряду, що необхідно для визначення параметра α було отримане з напруги Хола. Оцінений таким чином параметр Хоогє складає для різних зразків $\alpha_{\text{meas}} = 0,02 \div 3 \cdot 10^{-6}$ при температурі 300 К, і збільшувався із збільшенням температури (рис. 4). Згідно моделі флуктуації енергії типу $1/f$, запропонованої в роботі [13], параметр Хоогє для напівпровідників залежить від співвідношення величини параметра кристалічної ґратки і пробігу фононів α / λ , де α - стала ґратки і λ - середній вільний шлях пробігу фонона, який також залежить від температури. Дана модель враховує тільки електрон-фононну взаємодію, і не застосовна при низьких температурах, де розсіювання на домішках є домінуючим. Для цієї моделі достатньо враховувати тільки оптичне і акустичне розсіювання, хоча з аналізу транспортних характеристик відомо, що зразки містять точкові дефекти, домішки і пастки. Аналіз шумових даних, виконаний в рамках моделі, заснований на уявленні про бістабільні дефекти, при цьому врахування модуляції рухливості носіїв заряду дозволяє пояснити експериментальні дані. Модуляція рухливості виникає при розсіянні носіїв комплексами, які мають несиметричну конфігурацію – парними дефектами. Прикладом цього є диполі утворені, наприклад, донорно-акцепторними парами. Диполі, спонтанно міняючи свою орієнтацію, виступають в якості причини виникнення $1/f$ шуму. Відносну зміну компоненти повної рухливості обумовленої розсіюванням на одному дефекті можна виразити:

$$(\delta\mu_d)_1 = \frac{\mu_{di}^{(0)} - \mu_{di}^{(1)}}{\langle \mu_{di} \rangle} \quad (6)$$

Тут $\mu_{di}^{(0)}$ і $\mu_{di}^{(1)}$ – компоненти повної рухливості, обумовлені розсіюванням на одному і тому дефекті в різних його метастабільних станах, $\langle \mu_{di} \rangle$ – середнє значення цій компоненти. Елементарна відносна зміна $(\delta\mu_d)_1$ визначає глибину модуляції рухливості при перемиканні дефекту (флуктуатора) між метастабільними станами. Згідно цієї моделі [8], термоіндуковане перемикання стану дефекта визначає елементарний вклад в зміну повної рухливості і має характер випадкового, телеграфного процесу. Наявність ансамблю бістабільних дефектів приводить до флуктуацій повної рухливості із спектром вигляду $1/f$. Передбачається, що як у ролі надмірних розсіювачів виступають диполі, утворені донорно-акцепторними парами. Співвідношення для спектру відносних флуктуацій опору однорідного зразка [8] в уточненому варіанті для виразу Хооге має наступний вигляд:

$$S_{\delta R}(f) = \frac{(\mu / \mu_d)^2}{4N_d \ln(f_{high} / f_{low})} \times \left\langle (\delta\mu_d)_1^2 \right\rangle \cdot \frac{1}{f} \equiv \frac{\alpha}{Nf} \quad (7)$$

де: $N_d = V \times n_d$ – число бістабільних дефектів, V – об'єм зразка; μ_d – компонента повної рухливості, обумовлена розсіюванням на бістабільних дефектах-флуктуаторах; f_{low} і f_{high} – нижня і верхня частоти вимірювань; $N = V \times p$ – повне число носіїв заряду в зразку; f – частота аналізу. Права частина співвідношення (7) загальноприйнятий для однорідних резистивних зразків зв'язок параметра Хооге з характеризуючою інтенсивністю $1/f$ флуктуацій питомого опору. Фактично зміна струмового шуму в загальному випадку розглядається з точки зору моделі розсіювання носіїв на коливаннях ґратки. Флуктуації перетину розсіювання є наслідком фононних флуктуацій. Основний внесок дає фононне розсіювання, домішки при цьому не відіграють вирішальної ролі у виникненні низькочастотного шуму. Фононне розсіювання має простий ввклад у вигляді параметра α_{Latt} . Механізм фононного розсіювання враховує суперпозицію двох типів гілок – акустичних і оптичних фононів $\frac{1}{\mu_{Latt}} = \frac{1}{\mu_A} + \frac{1}{\mu_0}$.

В інтервалі досліджуваних температур переважає концентрація довгохвильових аку-

стичних фононів. Проте, в загальному випадку, розсіювання на енергетичному потенціалі акустичних фононів незначне:

$$\mu_A = D_A \cdot e^{\hbar\omega_A/kT} \quad (8)$$

Розсіювання ж на полярних оптичних фонах можна представити за допомогою рівняння Больцмана:

$$\mu_0 = D_0 \cdot \left(e^{\hbar\omega_0/kT} \right) \quad (9)$$

де: $\hbar\omega_A$, $\hbar\omega_0$ – енергії відповідно акустичних і оптичних полярних фононів, D_A і D_0 – константи, залежні від температури.

Таким чином, для постійної Хооге, що характеризує різні вклади розсіювання можна розмежувати:

- розсіювання домішками: $\alpha_{Latt}=0$;
- ґраткове розсіювання, акустичні фонони: $\mu_A = D_A \cdot e^{\hbar\omega_A/kT}$;
- ґраткове розсіювання, полярні оптичні фонони: $\mu_0 = D_0 \cdot e^{\hbar\omega_0/kT} = D_0 \cdot e^{T_0/T}$, де T_0 – температура Дебая.

Тому ґраткова постійна константи α :

$$\alpha_{Latt} = D_A \cdot \left(\frac{\mu_{Latt}}{\mu_A} \right)^2 + D_0 \cdot e^{T_0/T} \cdot \left(\frac{\mu_{Latt}}{\mu_0} \right)^2 \quad (10)$$

Ми припускаємо, що технологія матеріалів *CdTe* оцінюється в основному по електрофізичних характеристиках. Результати попереднього порівняння експериментальних шумових і електрофізичних даних показують, що можна рахувати ґратку напівпровідника з різними нерухомими дефектами і аналізувати хід їх коливань вводячи поняття “локальна рухливість”. Це найбільш проявляється у напівпровідниках, у яких можна оцінити роль оптичних фононів в генерації шуму $1/f$.

При розгляді шумових властивостей для напівпровідника з двома типами носіїв заряду нормалізована величина надмірного струмового шуму виражається через вклади окремих типів [14]:

$$\frac{fS_1(f)}{I^2} = \frac{\alpha_1 \mu_n^2 N + \alpha_2 \mu_p^2 P}{(N\mu_n + P\mu_p)^2} \quad (11)$$

При співвідношенні, $\mu_n^2 N \geq \mu_p^2 P$ отримуємо випадок, який визначається переважаючим темпом флуктуації розсіювання для одного з типів носіїв заряду (у даному випадку-електронів):

$$\frac{fS_1(f)}{I^2} = \frac{\alpha_1 N \mu_n^2}{P^2 \mu_p^2} \quad (12)$$

Величина густини шуму визначається електронною складовою розсіювання α_1 , як більш рухливих носіїв заряду.

Параметр Хооге, зазвичай, використовують щоб порівняти рівень шуму викликаний наявністю домішок і дефектів. Еквівалентний параметр Хооге - α_H пов'язаний з вимірювальним α_{meas} наступним виразом

$$\alpha_H = \alpha_{meas} \times (\mu_{Latt} / \mu_{meas})^2 \quad [15].$$

Якщо ми припускаємо, що унаслідок вирощування в зразках всі атоми домішки свинцю є центрами заміщення, і що N в (1) рівна кількості свинцю в цій партії зразків, можна оцінити параметр Хооге для зразків А і В: $\alpha_A = 2,7 \cdot 10^{-6}$ і $\alpha_B = 2,5 \cdot 10^{-2}$ при кімнатній температурі. Для зразка С, концентрація активованих центрів свинцю в ньому оцінена як $6,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ і це дає $\alpha_C = 3 \cdot 10^{-5}$. На температурній кривій параметра Хооге (рис. 5) найкраща узгодженість величини α була отримана у вимірювальному інтервалі температур для зразка С. Розраховані температурні значення μ_{Latt} слідує емпіричній залежності $\mu_{Latt}(T) = D_0 \cdot e^{0,33/kT}$ і по величині співпадають

з рухливістю неосновних носіїв заряду - електронів, які є більш рухливими. Подібні результати були отримані для зразків А і В.

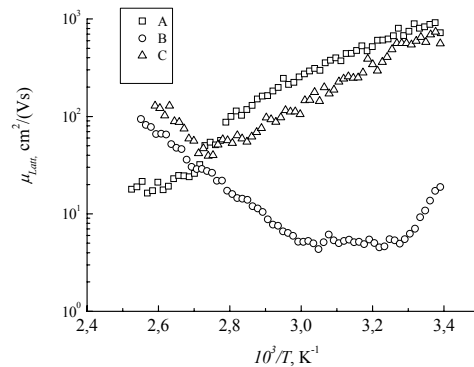


Рис. 5. Температурні залежності граткової складової рухливості носіїв заряду у зразках CdTe<Pb>.

Значно нижча граткова рухливість у зразку В ймовірно пов'язана з наявністю кластерних макродефектів. Значення α з ростом температури для всіх зразків в діапазоні $T > 370 \text{ K}$ проявляють тенденцію до зменшення. Це може бути пов'язано з переходом від стаціонарного до нестационарного нерівноважного стану кристалічної ґратки внаслідок необоротної генерації точкових дефектів при підвищенні температури.

Табл. 1

Зразки CdTe	p300, cm-3	μ300, cm²/(Vs)	μLatt.300, cm²/(Vs)	αmeas.300
A	2,1·1011	32	936	2,7·10-6
B	4,2·1011	64	19	2,5·10-2
C	6,5·1010	78	811	3,3·10-5

Висновок

Виконаний аналіз спектру струмового шуму в кристалічному CdTe легованому домішкою свинцю, беручи до уваги присутність дефектів ґратки і можливих кластерів в кристалічній матриці. Передбачається, що ці типи дефектів і неоднорідності можуть приводити до спостережуваного виду спектрів шуму. Енергія активації, обчислена з температурної залежності низькочастотного 1/f шуму складає 0,74 еВ і може бути пов'язана з дефектами-флуктуаторами, визначаючими локальну рухливість носіїв заряду. Енергія ж активації, обчислена з постійної Хола складає 0,48 еВ і визначається іонізацією глибокого акцептора. В області порівняно середніх частот в спектральній залежності потужності шуму проявляються злами викликані шумом генерації-рекомбінації носіїв заряду.

Література

1. J. Cwirko, C. Przybysz, R. Cwirko, P. Kaminski, Technique of low frequency noise vs temperature for identification of deep level defects in semiconductor materials // Proceeding of SPIE, Epilayers and Heterostructures in Optoelectronics and Semiconductor Technology, 4413, pp. 218-221 (2003)
2. P. Schauer, Identification of the source of 1/f noise in the CdTe crystals under illumination // Proceedings 17th International Conf. On Noise and Fluctuations, August, 18-22, Prague, pp. 190-196 (2003)
3. I. Asaad, B. Orsal, J. P. Perez, R. Alabedra, Shot noise in CdTe resistors: experimental and analytical studies // Proceedings 17th International Conf. On Noise and Fluctuations, August, 18-22, Prague, pp. 130-136 (2003)

4. *N.B. Lukyanchikova, A.A. Konoval, M.K. Sheinkman*, High-Frequency 1/f noise of photocurrent and residual conductivity in CdS // *Solid-State Electron.*, 18(1), p. 65-70 (1975)
5. *A.K. Raychaudhuri* Measurement of 1/f noise and its application in materials // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(1), pp. 67-85 (2002)
6. *P.M. Fochuk, O.A. Parfenyuk, O.E. Panchuk* Electrical characteristics of CdTe:Pb single crystals at high temperatures // *Semiconductors*, 40(60), pp. 646-650 (2006)
7. *G.P. Zhigal'skii* Nonequilibrium 1/f_y noise in conducting films and contacts // *Physics-Uspokhi*, 43 (5), pp. 449-472 (2003)
8. *А.В. Моряшин, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов* Донорно-акцепторные пары как причина шума в приборах на основе GaAs // *Радиофизика, Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, № 1, с. 78–82 (2007)
9. *N. Tanuma, M. Tacano, J. Pavelka, S. Hashiguchi, J. Sikula, T. Matsui* Hooge noise parameter of epitaxial n-GaN on sapphire // *Solid-State Electronics*, 49(6), pp. 865–870 (2005)
10. *M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev* Noise spectroscopy of local levels in semiconductors // *Semicond. Sci. Technol.*, 9(6), pp.1183-1189 (1994)
11. *T. Musha, M. Tacano* Dynamics of energy partition among coupled harmonic oscillators in equilibrium // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 346(3-4), pp. 339-346 (2005)
12. *S.V. Melkonyan, V.M. Aroutiounian, F.V. Gasparyan and H.V. Asriyan* Phonon mechanism of mobility equilibrium fluctuation and properties of 1/f-noise // *Physica B: Condensed Matter*, 382 (1-2), pp. 65-70 (2006)
13. *J. Wu, T. Tshepe, J. E. Butler, M. J. R. Hoch*, 1/f noise in semiconducting and just-metallic boron-implanted diamond // *Physical Review*, B 71(11), pp. 113108-113108-4 (2005)
14. *G.Leroy, J.Gest, L.K. Vandamme, J.C. Carru* Thermal annealing of MgO substrate increases 1/f noise in YBaCuOx at 300 K and reduces the sheet resistance in the superconducting thin film // *Physica C*, 425(1-2), pp. 27–36 (2005)
15. *X.Y. Chen, F.N. Hooge, M.R. Leys* The temperature dependence of 1/f noise in InP // *Solid-State Electronics*, 41(9), pp. 1269–1275 (1997)

¹Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

²Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

³University of Rzeszow, Poland

Поступила в редакцію 9 апреля 2012 г.